

**Н. В. Редькина\*, В. А. Скуднов**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,  
г. Нижний Новгород

\*rednatvik@gmail.com

## ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭЛИНВАРНОГО СПЛАВА 44НХТЮ ДЛЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИРОСКОПА

В работе представлены результаты экспериментального исследования термоциклической обработки сплава 44НХТЮ с разным количеством циклов. Обоснована возможность интенсификации процесса с помощью предложенной термической обработки.

*Ключевые слова:* дисперсионно твердеющий сплав, термоциклическая обработка, закалка, рентгеноструктурный анализ, испытание на релаксацию, микроструктура.

**N. V. Red'kina, V. A. Skudnov**

## THERMOCYCLIC TREATMENT OF ALLOY 44НХТЮ FOR ELASTIC ELEMENT OF THE GYROSCOPE

This paper deals with cyclic hardening alloy. Thermocyclic hardening to speed up the process of heat treatment and to grind grain. The present study provides a starting-point for further research in the thermocyclic treatment. Moreover, the influence of the technological parameters of the thermocyclic treatment regime on the structural changes in alloy 44НХТЮ is discovered and the most effective regime of this treatment is recommended.

*Keywords:* dispersion hardened alloys, thermocyclic processing, hardening, x-ray scattering techniques, relaxation of pressure, microstructure.

С целью повышения физико-механических и упругих свойств сплава 44НХТЮ для улучшения эксплуатационных характеристик в работе решались следующие задачи: исследование влияния технологических схем и режимов первичной термоциклической обработки (ПерТЦО) и вторичной термоциклической обработки (ВтТЦО) на микроструктуру и физико-механические свойства сплава; выбор оптимальных схем и режимов ПерТЦО и ВтТЦО, обеспечивающих повышение физико-механических и упругих свойств сплава 44НХТЮ.

В качестве исследуемого материала был выбран сплав 44НХТЮ. Термоциклическую обработку (ТЦО) проводили в лабораторной электропечи SNOL 8.2/1100, предназначенной для термообработки при температуре от 50 °С до 1100 °С в воздушной среде в стационарных

условиях. Микроструктура шлифа исследовалась под цифровым оптическим микроскопом высокого разрешения Keyence VHX-1000 при увеличении  $\times 100$ ,  $500$ ,  $1000$ .

Идентификация интерметаллидных соединений осуществлялась путем расшифровки дифрактограмм, полученных на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-2». Режимы съемки:  $U = 24$  кВ,  $I = 8$  мА, размер щели:  $1 \times 10 \times 2$  мм, излучение – Fe.

Испытания на растяжение производились на универсальной испытательной машине УМЭ-10ТМ с записью диаграммы. Расшифровка диаграммы производилась вручную. Измерение твердости производилось на твердомере ТК-2 с помощью метода Роквелла по ГОСТ 9013. Релаксационные испытания проводились на автоматизированной установке релаксационных испытаний. Нагружение производилось до тех пор, пока величина релаксации не достигала 60 % от величины приложенной нагрузки.

Акустические испытания материала проводились с использованием многофункциональной спектрально-акустической системы «Астрон». В системе реализован импульсный метод. Регистрируемые параметры упругих волн: время прохождения и затухание упругих импульсов, прошедших через контролируемую среду.

Для фрактографических исследований использовался электронный микроскоп (РЭМ). Разрешающая способность РЭМ обычно  $100 \text{ \AA}$ .

Результат предварительных экспериментальных исследований ПерТЦО показал, что наибольшее измельчение зерна получается при трех и четырех циклах. Анализ разработанных схем и режимов ПерТЦО для сплава 44НХТЮ позволил принять оптимальный режим, обеспечивающий увеличение скорости нагрева ТЦО, за счет расширения интервала термоциклирования в сторону понижения температуры от  $910 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow 350 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $910 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и получить зерно диаметром  $0,0020$  мм. При циклировании закалки в интервале температур  $910 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow 350 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , согласно классической схеме высокотемпературной термоциклической обработки по В. К. Федюкину, достаточного измельчения зерна и однородности структуры не удается достичь. Термический наклеп, создаваемый в результате ПерТЦО, позволяет получить более мелкую и однородную структуру, в сравнении с обычной закалкой.

Экспериментально разработанные режимы ВТЦО позволили установить оптимальный режим, обеспечивающий необходимый предел прочности  $\sigma_b = 1320$  МПа и минимальное время обработки 51 мин. В качестве ПерТЦО во всех режимах ВТЦО был режим:  $910 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 3 цикла (охлаждение в воде). В результате ВТЦО по режиму трехкратного циклирования прочность исследуемого сплава получилась выше, чем ВТЦО с большим (четыре и более) количеством циклов.

Экспериментальные исследования, проведенные в работе, также показали, что увеличение циклов ВтТЦО от шести до девяти в интервале температур от 750 до 500 °С ведет к снижению физико-механических характеристик. Увеличение количества циклов от пятнадцати до восемнадцати в интервале температур от 750 до 340 °С ведет к повышению физико-механических свойств, что связано с образованием карбидов в зоне неустойчивости аустенита. Сокращение времени выдержки при температуре 690 °С ведет к снижению прочности сплава 44НХТЮ. В результате обычного комбинированного старения после ПерТЦО прочность сравнима с ВтТЦО, но занимает гораздо больше времени. Наиболее высокая прочность получилась в результате применения низких температур после ВтТЦО.

С помощью рентгеновских исследований установлено выделение после ТЦС интерметаллидов  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ,  $(\text{FeNi})_3(\text{Ti,Al})$ ,  $(\text{FeNi})_3(\text{Ti,Al})$ ,  $\text{Cr}_2\text{Ti}$ , которые приводят к упрочнению сплава.

Влияние ТЦО на физико-механические свойства сплава 44НХТЮ показало, что оптимальное сочетание прочности и пластичности при минимальных энергозатратах достигается при применении режима ПерТЦО; ВтТЦО 750 °С↔20 °С, 1ц, 15 мин + 700 °С↔20 °С, 1ц, 15 мин + 600 °С↔20 °С, 1ц, 15 мин.

Акустические исследования показали, что увеличение количества циклов при среднетемпературном циклировании приводит к снижению упругих характеристик, а изменение количества циклов при высокотемпературном циклировании на упругие характеристики сильно не оказывает значительного влияния.

Фрактография изломов всех образцов после ТЦО показала, что в результате испытаний на разрыв наблюдается вязкая поверхность разрушения.

Установлена возможность замены длительной термической обработки (объемная закалка + искусственное старение) на ТЦО (ПерТЦО+ВтТЦО), позволяющей не только получить высокие значения физико-механических и упругих свойств сплава за счет измельчения зерна, но и значительно интенсифицировать процесс.